

# СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ И РЕМОНТА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРФОРАЦИОННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

А.Н. Громов, В.А. Шулов, Д.А. Теряев, А.Д. Теряев  
ММП имени В.В. Чернышева,  
ул. Вишневая, 7, А-80, ГСП-7, Москва, 123362, Россия, [teryaev\\_a@avia500.ru](mailto:teryaev_a@avia500.ru)

Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для ремонта и модифицирования лопаток турбины с перфорированными отверстиями.

## Введение

В [1] было показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности (СИЭП) является высокоэффективным инструментом для модифицирования и ремонта лопаток турбины с перфорационными отверстиями.

Было установлено [1], что модифицирование и восстановление свойств лопаток турбины с перфорационными отверстиями СИЭП не снижает усталостной прочности деталей. В то же время не проверялась скважность отверстий после облучения. Еще одним важным и нерешенным вопросом является качество поверхностного слоя лопаток после удаления поврежденных при эксплуатации покрытий с помощью СИЭП. Исходные детали характеризуются наличием под покрытием рекристаллизованного поликристаллического слоя, сформированного на стадиях подготовки монокристаллической заготовки с помощью пескоструйной обработки к нанесению покрытия и финишной термообработки лопаток с уже нанесенным покрытием. Облучение может спровоцировать трещинообразование на границах сформированных зерен. В этой связи целью настоящей работы являлось изучение влияния режимов облучения на состояние этого поликристаллического слоя.

## Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования использовались лопатки турбины двигателя РД-33 и образцы из сплава ЖС32ВН (Ni; 1.0-Ti; 5.6 – Cr; 6.2-Al; 1.4-Mo; 10.0-Co; 1.2-V; 1.4-N; 12.5-W; 0.18-C; <0.1 – O, N; <0.02-H; <0.015-B, термообработка: отжиг при 1250 °С в вакууме в течение 3 час, охлаждение со скоростью 50-60 град/мин, стабилизирующий отжиг при 1000 °С в вакууме в течение 2 час) с 60 микронным покрытием СДП-2 (основа-Ni; 18-22-Cr, 11-13.5-Al, 0.3-0.6-Y), нанесенным на установке МАП-1 по методике ВИАМ [2]. Часть лопаток до облучения разрезалась на электроэрозионном станке и исследовалась методами: рентгеноструктурного анализа и оптической металлографии. Обработка лопаток СИЭП проводилась на ускорителе «Геза-ММП» (энергия электронов – 115-125 кэВ; длительность импульса – 30-80 мкс; плотность энергии в пучке – 20-60 Дж/см<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения пучка – 30-80 см<sup>2</sup>; неоднородность распределения плотно-

сти энергии по сечению пучка – не более 10%) [1]. Лопатки после облучения также разрезались, а из полученных образцов-свидетелей изготавливались поперечные шлифы, в результате чего определялось состояние рекристаллизованного слоя под покрытием. Кроме того, были реализованы сравнительные испытания по «проливу» серийных и облученных лопаток для проверки сохранения скважности перфорационных отверстий.

## Экспериментальные данные и их обсуждение

Для проведения контрольного облучения из лопаток вырезались образцы, содержащие как минимум по 5 перфорационных отверстий. Обработка мишеней СИЭП проводилась на ускорителе «Геза-ММП» (энергия электронов – 115-150 кэВ; длительность импульса – 30-40 мкс; плотность энергии в пучке – 20-60 Дж/см<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения пучка – 30-80 см<sup>2</sup>; неоднородность распределения плотности энергии по сечению пучка – не более 10%). Образцы после облучения анализировались методом оптической металлографии с поверхностей как непосредственно мишеней, так и изготовленных поперечных шлифов. Результаты этого исследования частично представлены на рис. 1-4.

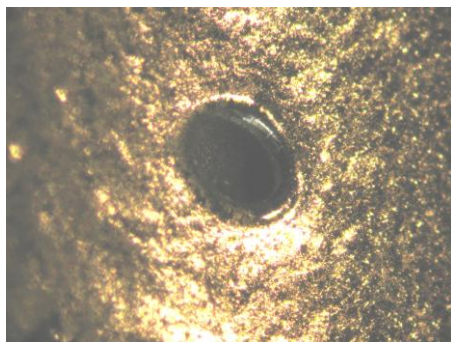


Рис. 1. Внешний вид лопатки ТВД с перфорационными отверстиями.

Из этих данных видно, что процесса растрескивания при обработке даже с плотностью энергии 40-60 Дж/см<sup>2</sup>, при которой реализуется ремонт лопаток [1], не происходит (рис. 2).

После этого облучались серийные лопатки в установке «Геза-ММП» при различных плотностях энергии от 20 до 40 Дж/см<sup>2</sup> четырьмя импульсами в режиме вращения мишеней, когда происходит

модификация поверхностей и спинки, и корыта. После этого мишени испытывались на пролив.



X20

Рис. 2. Внешний вид перфорационных отверстий на поверхности лопатки ТВД из сплава ЖС32В1 с покрытием СДП-2 после облучения 5 импульсами при плотности энергии 55-60 Дж/см<sup>2</sup>.

Результаты испытаний на пролив представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний трех лопаток на пролив при значениях  $Q-5=366^{+30}_{-17}$  г/с и  $Q-7=376^{+32}_{-21}$  г/с в соответствии с ТУ чертежа.

№	Величина пролива (серия) г/с		Величина пролива (СИЭП) г/с		W Дж/см <sup>2</sup>
	Q-5	Q-7	Q-5	Q-7	
10e29	391	397	386	401	20-22
10e49	391	400	388	401	32-34
10e57	396	405	390	400	40-42

Из этих данных видно, что облучение при различных плотностях энергии не влияет на пролив перфорационных отверстий и соответствует ТУ чертежа.

Облучение лопаток после наработки с целью удаления поврежденных покрытий было реализовано при плотностях энергии в импульсе 40-45 Дж/см<sup>2</sup>. Микроструктура поверхностного слоя серийной лопатки представлена на рис. 3.

Отчетливо видны два слоя покрытия и рекристаллизованный слой, который формируется на поверхности монокристаллической заготовки на стадиях подготовки поверхности к нанесению покрытия (пескоструйная обработка), собственно нанесения покрытия и финишной термообработки.

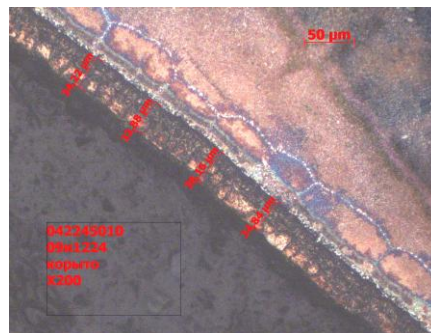


Рис. 3. Микроструктура в поверхностном слое серийных лопаток из сплава ЖС32В1.

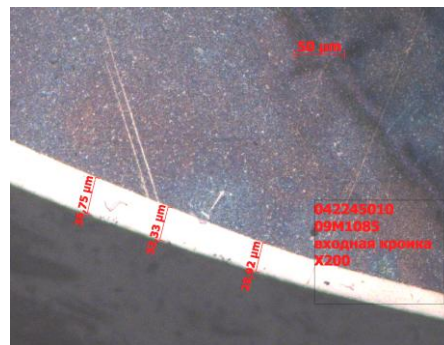


Рис. 4. Микроструктура в поверхностном слое серийных лопаток из сплава ЖС32В1 после удаления покрытия с помощью СИЭП при плотности энергии 40-45 Дж/см<sup>2</sup>.

### Заключение

Установлено, что модифицирование и восстановление свойств лопаток турбины с перфорационными отверстиями сильноточным импульсным электронным пучком не влияет на пролив лопаток, а приводит при удалении отработанных покрытий к формированию нерекристаллизованного слоя на поверхности монокристаллической заготовки.

Работа выполнена в соответствии с заданием Министерства образования и науки РФ.

### Список литературы

1. Шулов В.А., Новиков А.С., Энгелько В.И. Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения. М: Изд-во: ДИПАК, 2012. 292 с.
2. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2001. 632 с.

## APPLICATION OF INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS FOR MODIFICATION AND REPAIR OF TURBINE BLADES WITH PERFORATE HOLES

A.N. Gromov, V. A. Shulov, D. A. Teryaev, A. D. Teryaev  
Chernyshev Machine Building Enterprise,  
7 Vishnevaya Street, A-80, GSP-7, Moscow 123362, Russia, teryaev\_a@avia500.ru

It is shown that intense pulsed electron beam of microsecond duration is a high effective instrument for modification and repair of turbine blades with perforate holes.